



## EVALUACIÓN DE PRODUCTOS FOTOGRAMÉTRICOS DE UNA UNIDAD KÁRSTICA OBTENIDOS CON UN DRON †

### [EVALUATION OF PHOTOGRAMMETRIC PRODUCTS OF A KARST UNIT OBTAINED WITH A DRONE]

Neftaly Gijón-Yescas<sup>1</sup>, Héctor Estrada-Medina<sup>1</sup>, Yameli Aguilar-Duarte<sup>2\*</sup>,  
Rubén Arturo Medina-Esquivel<sup>3</sup> and Jorge Iván Euán-Ávila<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma de Yucatán. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia. Carretera Mérida-Xmatkuil, Km. 15.5, Mérida, Yucatán, México. C.P. 97100. Email: nefthally@gmail.com, hectorstradamedina@gmail.com

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Av. Correa Rachó por calle 15, Col. Díaz Ordaz, Mérida, Yucatán, México. C.P. 97130. Email: yaguilarduarte@gmail.com

<sup>3</sup> Universidad Autónoma de Yucatán. Facultad de Ingeniería. Av. Industrias No Contaminantes, Periférico Norte, Cordemex, Mérida, Yucatán, México. C.P. 150. Email: rmedina.esquivel@gmail.com

<sup>4</sup> Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional - Unidad Mérida. Antigua Carretera a Progreso Km 6, Cordemex, Loma Bonita Xcumpich, Mérida, Yucatán, México. C.P. 97310. Email: jorge.euan@cinvestav.mx

\*Corresponding author

#### SUMMARY

**Background.** The rapid technological development of drones has been used in different disciplines as a new tool for the collection of geospatial data. Depending on the application of geospatial data, users may not require high absolute precision and therefore the measurement error within the model (relative precision) may be more important.

**Objective.** To determine the root mean square error and the relative precision of the orthomosaics and digital elevation models at different heights generated with the SfM photogrammetric technique and a drone, over a sinkhole located in the Cenote Ring in the state of Yucatán. **Methodology.** Aerial images were acquired with a DJI Phantom 4 drone over a sinkhole at two heights, 80 and 100 m. Subsequently, the aerial images were processed obtaining digital elevation models (DEM) and orthomosaic with which the root mean squared error (RMSE) of the UTM coordinates (x, y) and elevations (z) was calculated. Finally, the relative precision was calculated by comparing the measurements in the field with those obtained in the DEMs and orthomosaics. **Results.** Flights at 100 m altitude showed the least variation in coordinates and elevations compared to flights at 80 m. The highest relative precision was recorded at 100 m high in the orthomosaics and ranged from 0.03 to 0.36 m with an average value of 0.22 m. **Implications.** With these results we can affirm that it is possible to carry out studies without control points in applications where a consistent and centimeter precision is not required. **Conclusion.** The 100 m high flights had the lowest RMSE and the highest relative accuracy.

**Keywords:** Relative precision; root mean squared error; digital elevation models; orthomosaic

#### RESUMEN

**Antecedentes.** El rápido desarrollo tecnológico de los drones se ha utilizado en diferentes disciplinas como una nueva herramienta para la recolección de datos geoespaciales. Dependiendo de la aplicación de los datos geoespaciales, los usuarios pueden no requerir una alta precisión absoluta y, por lo tanto, el error de medición dentro del modelo (precisión relativa) puede ser más importante. **Objetivo.** Determinar la raíz del error cuadrático medio y la precisión relativa de los ortomosaicos y modelos digitales de elevación a diferentes alturas generados con la técnica fotogramétrica SfM y un dron, sobre una dolina ubicada en el Anillo de Cenotes en el estado de Yucatán. **Metodología.** Las imágenes aéreas se adquirieron con un dron *DJI Phantom 4* sobre una dolina a dos alturas, 80 y 100 m. Posteriormente, las imágenes aéreas se procesaron obteniendo modelos digitales de elevación (MDE) y ortomosaicos con los cuales se calculó la raíz del error cuadrático medio (RMSE) de las coordenadas UTM (x,y) y elevaciones (z). Finalmente, se calculó la precisión relativa comparando las mediciones en campo con las obtenidas en los MDEs y ortomosaicos. **Resultados.** Los vuelos a 100 m de altura presentaron la menor variación de las

† Submitted July 14, 2020 – Accepted December 8, 2020. This work is licensed under a CC-BY 4.0 International License. ISSN: 1870-0462.

coordenadas y elevaciones comparadas con los vuelos a 80 m. La precisión relativa más alta se registró a 100 m de altura en los ortomosaicos y varió de 0.03 a 0.36 m con un valor promedio de 0.22 m. **Implicaciones.** Con estos resultados podemos afirmar que es posible realizar estudios sin puntos de control en aplicaciones donde no se requiera una precisión centimétrica y consistente. **Conclusión.** Los vuelos a 100 m de altura presentaron RMSE más bajos y la precisión relativa más alta.

**Palabras clave:** precisión relativa; raíz del error cuadrático medio; modelos digitales de elevación; ortomosaicos.

## INTRODUCCIÓN

El rápido desarrollo tecnológico de los vehículos aéreos no tripulados (VANTs), comúnmente conocidos como drones, se ha utilizado en diversas disciplinas (Akturk y Altunel, 2019) como una nueva herramienta para la recolección de datos geoespaciales, especialmente aplicados al mapeo de alta resolución (Klema, 2015).

Los drones pueden adquirir imágenes aéreas en una ubicación específica, al establecer los parámetros de altura, velocidad, traslape frontal y lateral (Nex y Remondino, 2014). El procesamiento fotogramétrico de las imágenes aéreas se puede realizar a través de software instalado en un ordenador (Agisoft Metashape, Pix4DMapper) o soluciones basadas en la nube (DroneDeploy, OpenDroneMap) (Hathcock y MacNeille, 2016).

La exactitud y precisión de los resultados obtenidos en el mapeo 2D (ortomosaicos) y 3D (modelos digitales de elevaciones) basado en el procesamiento fotogramétrico de Structure from Motion (SfM, Estructura del Movimiento por sus siglas en inglés) está revolucionando la mayoría de las disciplinas donde se mapean áreas de hasta 100 ha (Rokhmana, 2015; Kalacska *et al.*, 2017). Las ventajas del mapeo con drones y la técnica SfM incluyen una alta resolución espacial y temporal (He y Weng, 2018), flexibilidad, reducción de tiempos y costos, disminución de riesgos en zonas remotas y de difícil acceso (Hung *et al.*, 2019; Colomina *et al.*, 2008; Nex y Remondino, 2014).

SfM es una técnica fotogramétrica de bajo costo para la reconstrucción topográfica de alta resolución y es ideal para las investigaciones de bajo presupuesto en áreas remotas (Westoby *et al.*, 2012). De forma similar a la fotogrametría tradicional, los algoritmos SfM localizan puntos comunes en las imágenes 2D (con altos traslapes) tomadas en diferentes posiciones y ángulos por medio del cual los objetos y superficies son reconstruidos en 3D (James y Robson, 2012). La técnica SfM produce ortomosaicos, modelos digitales de elevación (MDE), mallas texturizadas y nubes de puntos con alta resolución espacial en el orden de centímetros (Kalacska *et al.*, 2020).

Las aplicaciones donde se requiere una alta precisión y exactitud utilizan puntos de control para mejorar la georeferencia de los productos fotogramétricos con

respecto a las coordenadas del mundo real (precisión absoluta) y para asegurar que las mediciones precisas de la geometría de los objetos (dimensiones, distancias y volumen) estén representadas (precisión relativa) (Koci *et al.*, 2017). No obstante, el uso de puntos de control consume tiempo y recursos además de requerir instrumentos costosos (Xiang y Tian, 2011). Asimismo, en ocasiones es impráctico utilizarlos por la inaccesibilidad, lejanía o extensión del área de estudio (Zmarz *et al.*, 2018).

Dependiendo del propósito de la recolección de los datos geoespaciales, los usuarios pueden no requerir una alta precisión absoluta (coordenadas reales) y por lo tanto el error de medición dentro del modelo (precisión relativa) puede ser más importante (Kalacska *et al.*, 2020). Hung *et al.*, (2019) volaron un dron *DJI Phantom 4* una vez al mes durante un periodo de siete meses sobre el cementerio Oak Grove en Nocogdoches, Texas, EE.UU. para determinar si las coordenadas UTM de 30 puntos de validación variaban en cada vuelo. Sus resultados mostraron que la precisión relativa fue más alta en el centro del ortomosaico que en sus bordes. Manfreda *et al.*, (2019) utilizó diferentes configuraciones de vuelos con dron para encontrar la combinación óptima y obtener la mayor precisión en los productos SfM. Los autores destacan que una combinación óptima de planes de vuelo puede reducir el error relativo de los modelos 3D a dos metros sin la necesidad de usar puntos de control. Kalacska *et al.*, (2020) probaron 14 drones en Canadá para determinar la precisión dentro del modelo con SfM en paisajes de bajo relieve sin puntos de control. Los autores concluyen que con los productos Structure from Motion with Multi-View Stereo photogrammetry (SfM-MVS, Estructura del Movimiento con Fotogrametría Estéreo Multivista por sus siglas en inglés) generados a partir de drones con geotiquetado a bordo se obtienen mayores precisiones posicionales y menores errores dentro del modelo.

Los drones no han sido utilizados de manera amplia en estudios del relieve kárstico, a pesar de sus potencialidades comparado con herramientas como las imágenes aéreas, de satélite y LiDAR (Light Detection and Ranging), por lo cual existe una gran oportunidad para aplicar esta tecnología en paisajes kársticos con bajos contrastes altitudinales (Silva *et al.*, 2017; Telbisz *et al.*, 2016; Colín Olivares, Frausto Martínez y Rodríguez Castillo, 2019) y en

investigaciones de bajo presupuesto (Westoby *et al.*, 2012).

El objetivo del estudio es determinar la raíz del error cuadrático medio y la precisión relativa de los ortomosaicos y modelos digitales de elevación a diferentes alturas generados con la técnica fotogramétrica SfM y un dron, sobre una dolina ubicada en el Anillo de Cenotes en el estado de Yucatán.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

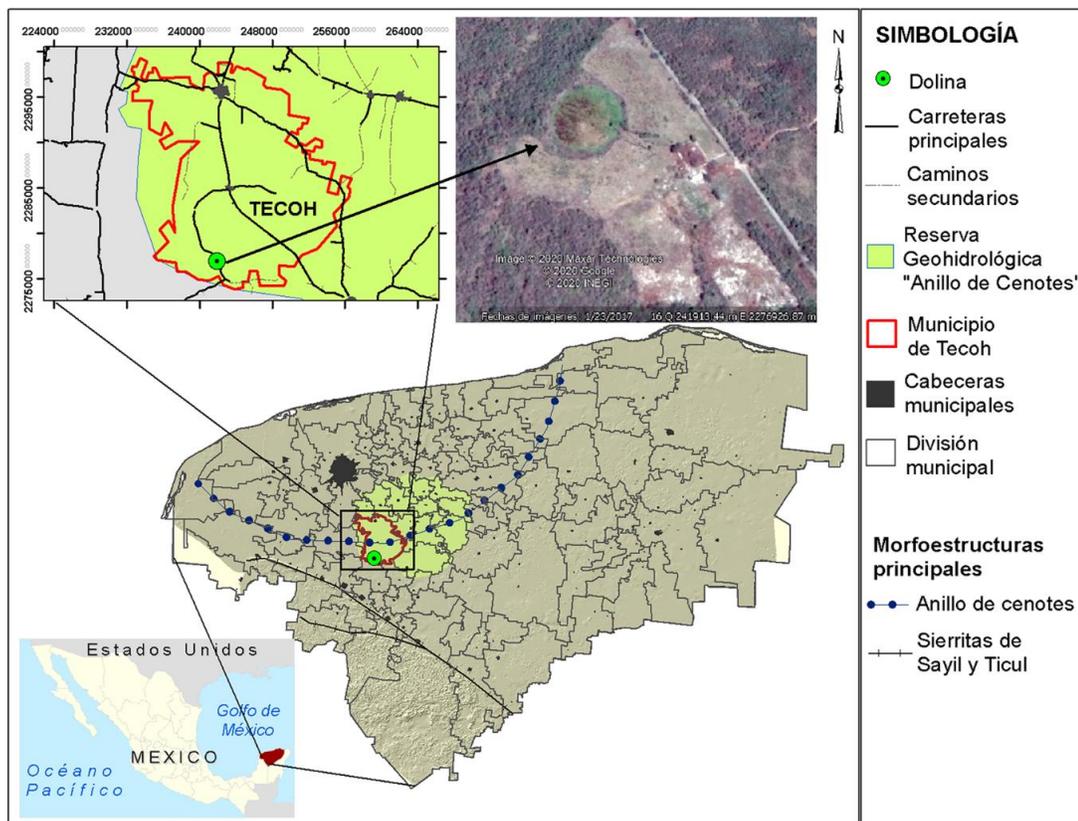
La zona de estudio es una dolina ubicada en un predio particular con una extensión de 6.5 ha, con coordenadas  $89^{\circ}28'32.74''\text{O}$  y  $20^{\circ}34'22.75''\text{N}$ , en el municipio de Tecoh, Yucatán, México. Este es uno de los municipios que pertenecen a la Reserva Geohidrológica "Anillo de Cenotes", ubicado sobre una planicie kárstica entre 10 y 20 m.s.n.m. (Aguilar *et al.*, 2016) (Figura 1).

El subtipo de clima predominante es AWo (Orellana Lanza, Espadas Manrique y Nava Marín, 2010) con una duración del periodo de lluvias de cinco a seis

meses (Delgado *et al.*, 2017), con suelos predominantemente de Leptosoles y Cambisoles (Bautista *et al.*, 2015). En general el municipio de Tecoh cuenta con vegetación dominante de selva mediana caducifolia y algunas zonas con agricultura de temporal. En la zona particular de estudio, el predio tiene un uso mixto, ya que una parte de la dolina es usada para el pastoreo de ganado vacuno y otra tiene vegetación natural conservada.

### Adquisición de imágenes aéreas y datos en campo

Las imágenes aéreas se adquirieron en tres etapas de trabajo (prospección, análisis de la raíz del error cuadrático medio y análisis de la precisión relativa). Se utilizó un dron *DJI Phantom 4* (DJI Enterprise, China). Las especificaciones del dron se muestran en la Tabla 1. Los planes de los vuelos autónomos para adquirir las imágenes aéreas con el dron se diseñaron y ejecutaron con la aplicación Pix4Dcapture (Pix4D SA; Lausanne, Suiza) instalado en un *iPhone*, con traslape frontal de 75%, traslape lateral de 70%, ángulo de la cámara a  $90^{\circ}$ , velocidad de vuelo de 15 m/s y un área de 12.8 ha. Todos los vuelos fueron diseñados con un *buffer* de 70 m para minimizar las deformaciones en los bordes de los ortomosaicos del área de estudio.



**Figura 1.** Ubicación del área de estudio dentro del contexto estatal y local. En el ángulo superior derecho, se presenta la dolina de estudio en una imagen de Google Earth con fecha de 23 de enero de 2017.

**Tabla 1. Características del dron utilizado.**

Especificaciones	DJI Phantom 4
Peso	1380 g
Distancia diagonal	350 mm
Tiempo de vuelo máximo	28 min
Resistencia al viento máxima	36 km/h
Sistema de posicionamiento por satélite	GPS/GLONASS
Sensor de la imagen	1/2.3", 12.4MPx efectivos
Precisión vuelo estacionario vertical	±0.1 m (con posicionamiento visual) ±0.5 m (con posicionamiento por GPS)
Precisión vuelo estacionario horizontal	±0.3 m (con posicionamiento visual) ±1.5 m (con posicionamiento por GPS)

(Fuente: DJI, 2020)

Las imágenes aéreas fueron georeferenciadas con el GPS del dron y la altitud fue registrada con su barómetro interno. Esta información se guardó automáticamente en cada imagen en coordenadas WGS84 y en formato JPG EXIF (Manfreda *et al.*, 2019).

La primera etapa fue prospectiva y para ello se realizó un vuelo el 14 de febrero de 2020 a 100 m de altura para obtener un primer ortomosaico del área de estudio. Este ortomosaico sirvió para ubicar de forma preliminar 20 puntos de referencia distribuidos en todo el terreno de manera uniforme y en sitios que fueran claramente visibles abarcando el fondo, la pendiente y el área externa de la dolina. Las coordenadas de estos puntos fueron exportadas en formato *.kml* a la aplicación de iOS GPS Tracks (Dmssoftwaresolutions, E.U.) para ser ubicadas en campo en la siguiente etapa.

La segunda etapa de trabajo se realizó el día 26 de marzo de 2020. Como primer paso se ubicaron los 20 puntos de referencia reales con la aplicación GPS Tracks y se colocaron marcas sobre el terreno (lonas de plástico de 1 m<sup>2</sup>) en cada punto. Se procedió a realizar los planes de vuelo entre las 14:00 y las 16:00 h, a dos diferentes alturas (80 y 100 m) por duplicado.

La tercera etapa del trabajo se efectuó el 10 de junio de 2020, posterior a un evento hidrometeorológico extraordinario (Tormenta "Cristóbal"). En esta última etapa se colocaron y marcaron únicamente 14 puntos de referencia en la zona cercana a la dolina. Esta zona

estaba libre de vegetación alta para hacer las mediciones entre los 14 puntos de referencia con una cinta métrica. Al medir las distancias en la dolina, la cinta se colocó (sin tensarla) a nivel del terreno para considerar las irregularidades (hierbas y desniveles) entre los transectos. Adicionalmente, se midieron diversas secciones de una construcción ubicada en el exterior de la dolina. Al medir los elementos de la construcción la cinta fue tensada. Por último, se realizaron los sobrevuelos entre las 15:00 y las 18:00 h a dos alturas (80 y 100 m) por duplicado.

### Procesamiento de los datos

El procesamiento de los datos se refiere a la unión de las imágenes georeferenciadas y se puede resumir en tres etapas: 1) calibración de los datos, 2) reemplazo de la nube de puntos y 3) generación de los productos fotogramétricos (nube de puntos, ortomosaico, MDE, modelo 3D y mallas) (Ezat, Fritsch y Downs, 2018). Las imágenes de los vuelos fueron procesadas fotogramétricamente en la plataforma en línea DroneDeploy (DroneDeploy, Inc., E.U.) para generar los ortomosaicos y los MDE.

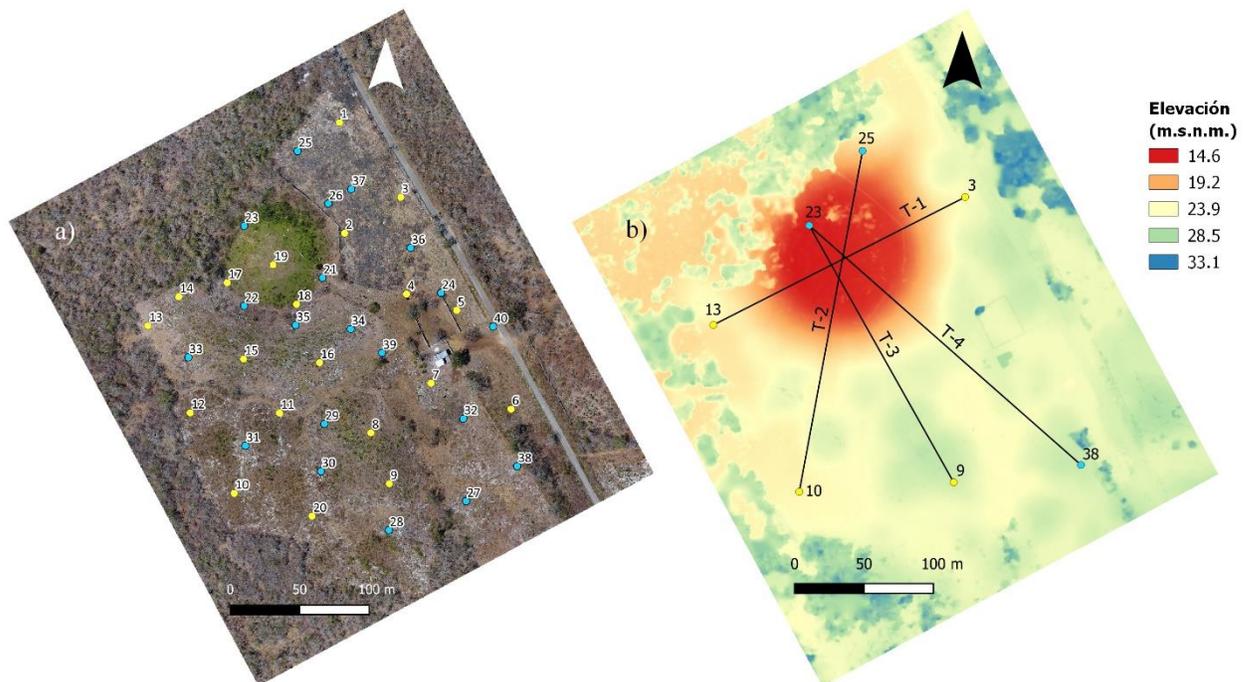
Las resoluciones espaciales de los ortomosaicos y MDE para los vuelos a 80 m fueron de 3.2 y de 12.8 cm/px respectivamente. En los vuelos a 100 m las resoluciones de los ortomosaicos y los MDE fueron de 3.9 y de 15.6 cm/px respectivamente. Cada ortomosaico y MDE fue referenciado al sistema de coordenadas WGS84/UTM zona 16N.

### Calculo de la raíz del error cuadrático medio

El cálculo de la raíz del error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés) nos permitió conocer si los ortomosaicos y MDEs tienen variaciones en las coordenadas y elevaciones respectivamente, con base en puntos de referencia (reales y virtuales).

Para el cálculo del RMSE se utilizaron los 20 puntos de referencia colocados en campo más otros 20 puntos virtuales ubicados directamente en los ortomosaicos de la segunda etapa. Los puntos virtuales se ubicaron con base en características del terreno fácilmente distinguibles en los ortomosaicos (rocas, construcciones y objetos con posición fija).

Con el software *QGIS* versión 3.10.6 y el *plug-in* "Point sampling tool" se obtuvieron las coordenadas UTM (x, y) a partir de los ortomosaicos y las elevaciones (z) de los MDEs (generados en la segunda etapa), de los 20 puntos de referencia colocados en campo (reales) y los 20 puntos virtuales (Figura 2a).



**Figura 2.** a) Ejemplo de un ortomosaico donde se indican los puntos de referencia reales (en amarillo) y virtuales (en azul) utilizados para el cálculo de la raíz del error cuadrático medio en x, y, z; b) Modelo digital de elevaciones donde se señalan los cuatro transectos trazados para evaluar la raíz del error cuadrático medio en las elevaciones.

En cada altura (80 y 100 m) se compararon los conjuntos de coordenadas (x, y) y elevaciones (z) para determinar su RMSE, de forma similar a lo realizado por Hung *et al.*, (2019). El RMSE se determinó para cada conjunto de coordenadas y elevaciones utilizando la Ecuación 1 (Akturk y Altunel, 2019).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - X_{ti})^2}{n}} \quad (1)$$

Dónde: *RMSE* es la raíz del error cuadrático medio para los conjuntos de coordenadas UTM (x, y) y elevaciones (z), n es el número de puntos de referencia (reales y virtuales) y ( $X_i - X_{ti}$ ) es la diferencia en metros entre cada conjunto de coordenadas y elevaciones.

Para visualizar el RMSE de las elevaciones (z), sobre los MDEs se trazaron y obtuvieron los perfiles de cuatro transectos (T) entre puntos de referencia, siendo éstos los siguientes: T1= 13-3, T2= 10-25, T3= 9-23 y T4= 38-23 para cada uno de los MDEs generados (dos MDEs a 80 m y dos MDEs a 100 m) (Figura 2b).

### Cálculo de la precisión relativa

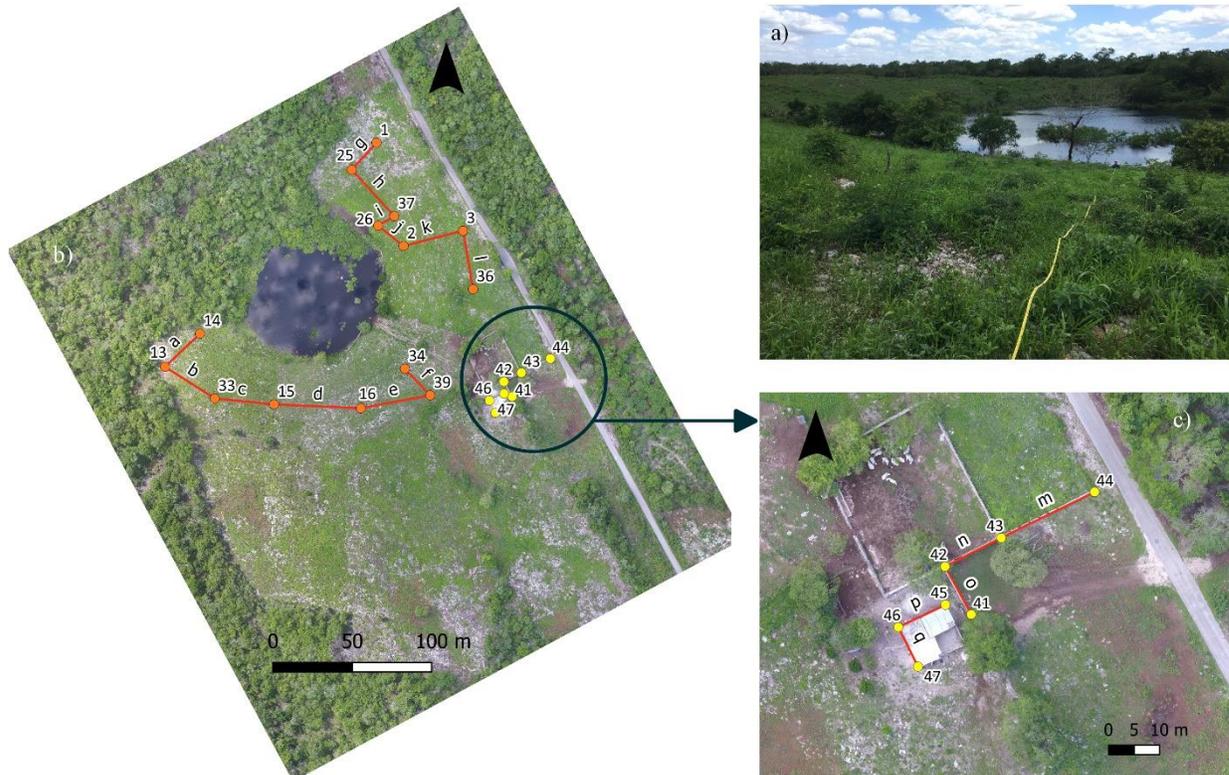
La precisión relativa fue determinada al comparar las distancias medidas en campo con las obtenidas en los ortomosaicos y MDEs de la tercera etapa, de forma similar a lo realizado por Kalacska *et al.*, (2020).

Las medidas de campo (Figura 3a) obtenidas entre los 14 puntos de referencia (Figura 3b) se compararon con las mediciones sobre los MDE hechas con el software QGIS 3.10.6 y el *plug-in* "Profile tool". Asimismo, las medidas de campo realizadas en la construcción se compararon con las generadas en los ortomosaicos al definir siete puntos virtuales entre los cuales se realizaron las mediciones con el software QGIS 3.10.6 (Figura 3c).

## RESULTADOS

### Raíz del error cuadrático medio

Los resultados del RMSE de las coordenadas (x,y) y elevaciones (z) obtenidos a 80 y 100 m de altura se resumen en la Tabla 2. Los vuelos a 100 m de altura presentaron valores más bajos del RMSE, tanto para las coordenadas y las elevaciones. El RMSE (x,y) fue mayor a 80 m de altura con una diferencia de 0.49 m en "x", 1.02 m en "y" y 0.57 m en "z" con relación a los valores del vuelo a 100 m de altura.



**Figura 3.** a) Mediciones en campo con cinta métrica sin tensar, para su comparación con los modelos digitales de elevación, b) Ortomosaico con la ubicación de los 14 puntos de referencia en color naranja y transectos entre puntos; se indican también los siete puntos virtuales (en color amarillo) que remarcan parte de la construcción, c) Detalle de los siete puntos virtuales donde se midieron las longitudes de la construcción aledaña.

**Tabla 2. Raíz del error cuadrático medio (x,y,z) a 80 y 100 m de altura.**

RMSE (m)	Altura de los vuelos	
	80 m	100 m
x	0.62	0.13
y	1.16	0.14
z	0.80	0.23

Las diferencias en los valores del RMSE(z) para cada uno de los 40 puntos de referencia (reales y virtuales) se presentan en la Figura 4. Se observa que, para el vuelo a 80 m de altura los valores mínimo y máximo de RMSE(z) fueron de 0.29 m a 0.75 m, respectivamente. En cambio, para el vuelo a 100 m de altura fueron más bajos, de 0.006 m a 0.32 m.

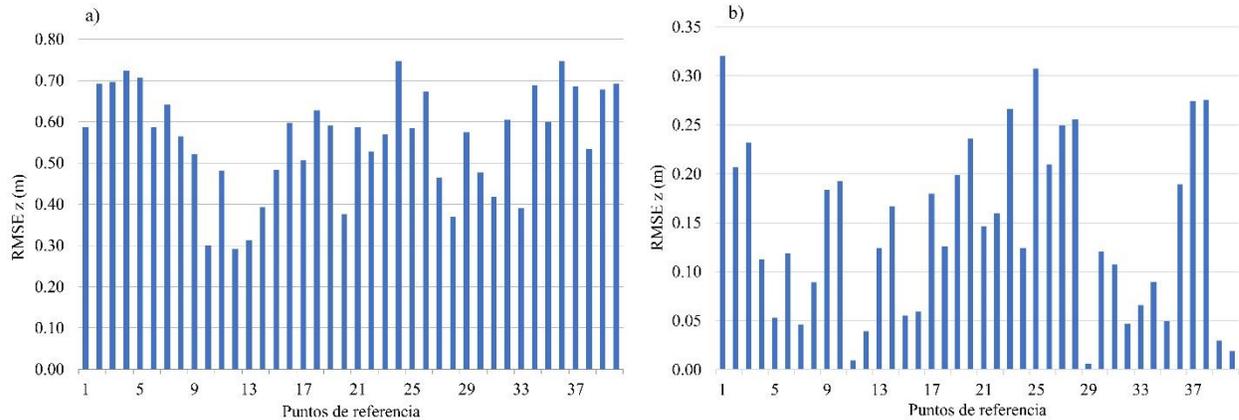
La variación en las elevaciones para ambas alturas se puede visualizar en los cuatro perfiles generados con los transectos (Figura 5). En los perfiles de ambas alturas se observan patrones similares de

comportamiento, sin embargo, en los vuelos a 100 m de altura existe menor variación al haber segmentos que se sobrepone o la diferencia de alturas entre ellas es muy pequeña en comparación con los perfiles a 80 m. Otro aspecto importante es la visualización de los perfiles de los cuatro transectos, en donde se esquematizan las formas de las pendientes de la dolina.

### Precisión relativa

Los resultados de las mediciones de campo y las generadas con MDEs y ortomosaicos se presentan en la Figura 6 y 7 respectivamente.

La precisión relativa en los MDEs a 80 m varió de 0.42 (transecto g) a 1.48 m (transecto k) con un valor promedio de 0.94 m. Para 100 m la precisión relativa en los MDEs tuvo un rango de 0.41 (transecto g) a 1.54 m (transecto k) con un promedio de 0.94 m (Figura 6). Las medidas en campo siempre fueron mayores en ambas alturas. Asimismo, no se encontró una relación entre la longitud de las distancias medidas y la diferencia entre ellas.



**Figura 4.** Raíz del error cuadrático medio de las elevaciones (z) para los 40 puntos de referencia a) 80 m; b) 100 m de altura.

La precisión relativa en los ortomosaicos a 80 m varió de 0.08 (trayecto q) a 0.27 m (trayecto m, p) con un valor promedio de 0.19 m. En 100 m la precisión relativa varió de 0.03 (trayecto q) a 0.36 m (trayecto n) (Figura 7) con un valor promedio de 0.22 m.

En dos trayectos las medidas de campo fueron mayores que las generadas por los ortomosaicos (trayecto n, q), en el resto fueron menores y se representaron las diferencias con valores negativos (Figura 7).

## DISCUSIÓN

El rápido desarrollo de los drones ha hecho posible obtener datos geoespaciales con una alta resolución espacial, temporal y de bajo costo (He y Weng, 2018). Dependiendo de la aplicación de los datos geoespaciales, los usuarios pueden no requerir una alta precisión absoluta y por lo tanto el error de medición dentro del modelo (precisión relativa) puede ser más importante (Kalacska *et al.*, 2020). En este estudio se determinó el RMSE y la precisión relativa en los ortomosaicos y MDEs obtenidos a 80 y 100 m de altura en una dolina ubicada en planicies con bajos contrastes altitudinales.

El  $RMSE(x,y)$  es ligeramente más bajo que el  $RMSE(z)$  en los vuelos a 100 m de altura. Estos resultados son similares a los encontrados por Manfreda *et al.*, (2019) al explicar que por los principios fotogramétricos, reconstruir la altura es más difícil que reconstruir el plano horizontal. Por ello las elevaciones estimadas con SfM se ven afectadas por un error uno o dos veces más grande que las coordenadas planas (Manfreda *et al.*, 2019). Sin embargo, esto no aplicó para los vuelos a una

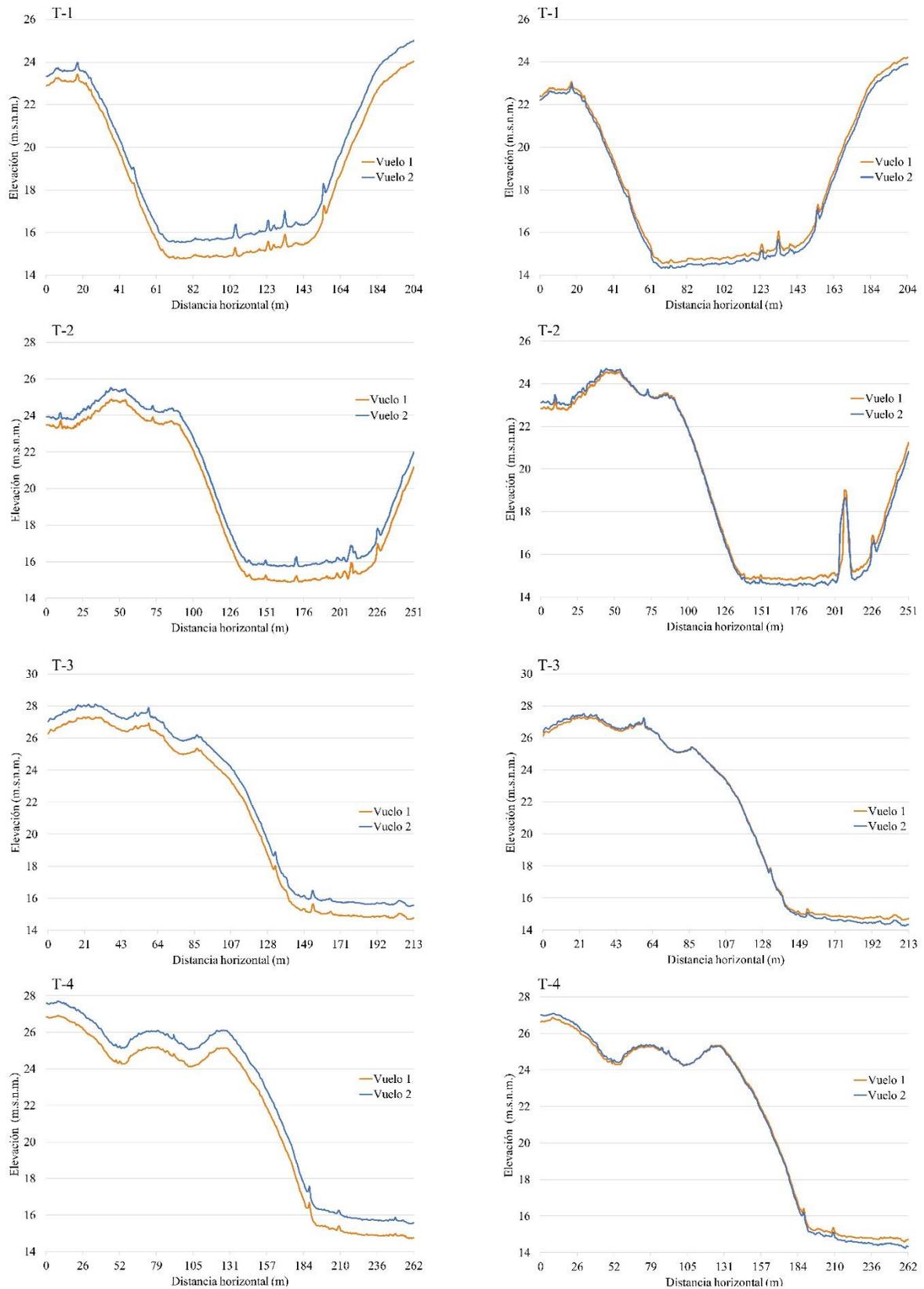
altura a 80 m, esto pudo suceder por la influencia de factores externos como las condiciones de iluminación, velocidad y dirección del viento (Leitão *et al.*, 2016).

El  $RMSE(z)$  fue menor en los vuelos a 100 m de altura; no afectando el incremento de la altura en la diferencia de las elevaciones. Esta particularidad ha sido observada por Gómez-Candón, De Castro y López-Granados, (2014) al reportar  $RMSE$  más bajos a mayores alturas.

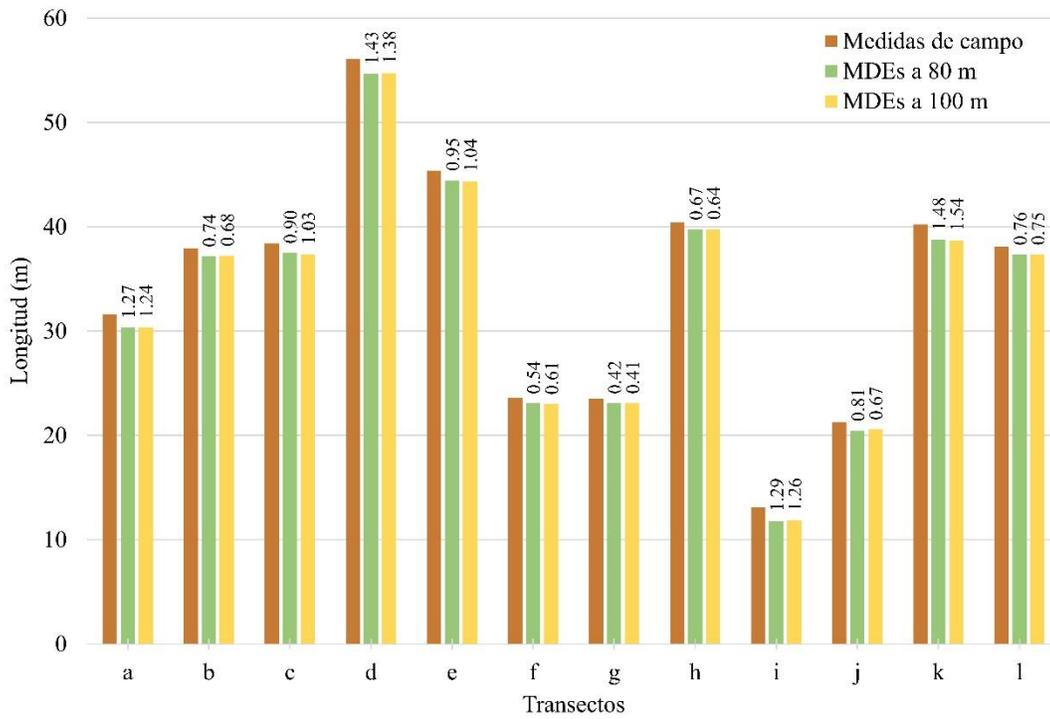
Los perfiles trazados en ambas alturas describen de manera precisa la forma del terreno y la dolina. Las formas del terreno observadas fueron: convexa, cóncava, compleja y lineal. En algunos perfiles (a, b, c) el  $RMSE(z)$  se incrementó en el fondo de la dolina, esto fue más notorio a 80 m lo cual se atribuye al desnivel de casi 10 m registrado.

En este estudio la precisión relativa más alta se registró a 100 m de altura en los ortomosaicos y varió de 0.03 a 0.36 m con un valor promedio de 0.22 m. Este dato fue mucho menor que el reportado por Chirico y Dewitt, (2017), quienes determinaron un valor promedio de la precisión relativa de 1.31 m medida en los ortomosaicos a 100 m de altura utilizando un *DJI Phantom 1*.

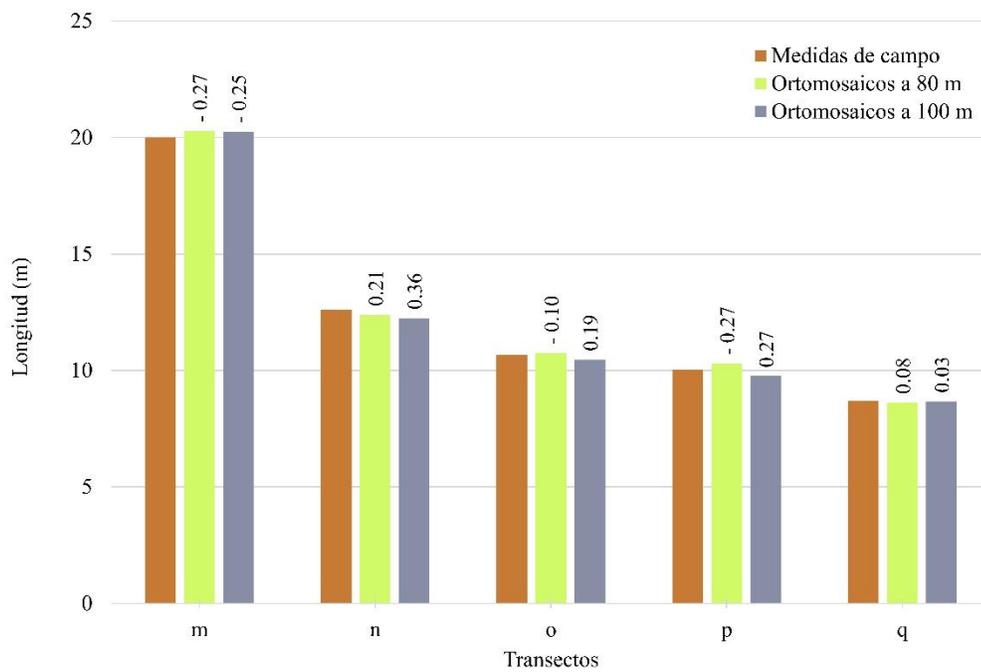
La precisión relativa en los MDEs fue muy similar en ambas alturas con el mismo valor promedio (0.94 m) y registrando valores mínimos y máximos de 0.42 y 1.48 m (80 m de altura) y de 0.41 y 1.54 m (100 m de altura) respectivamente. Estos valores están por debajo de los registrados por Chirico y Dewitt, (2017) quienes reportaron valores de la precisión relativa en MDEs de 0.76 a 2.98 m.



**Figura 5.** Perfiles de los transectos generados con los modelos digitales de elevación a 80 m (izquierda) y 100 m (derecha) de altura.



**Figura 6.** Comparación de las mediciones de campo con las medidas en los modelos digitales de elevación en la dolina. El número sobre cada barra indica la diferencia entre las medidas en campo y las obtenidas con los modelos digitales de elevación.



**Figura 7.** Diferencias de las mediciones de campo con las medidas en los ortomosaicos de la construcción alledaña a la dolina. El número sobre cada barra es la diferencia de las medidas en campo y las obtenidas con los ortomosaicos.

Los resultados del estudio muestran que al aumentar la altura de vuelo no se incrementó la variabilidad (RMSE) de las coordenadas y las elevaciones. Esto es relevante debido a que a mayores alturas de vuelo se pueden cubrir áreas más grandes y en menor tiempo, haciendo más eficiente la captura de datos geoespaciales. Lo anterior es de suma importancia al realizar estudios en lugares donde no existen fuentes cercanas de energía eléctrica para la recarga de baterías (Chirico y Dewitt, 2017).

La precisión relativa más baja generada en los ortomosaicos y MDEs fue de 0.03 y de 0.41 m obtenidos en los vuelos a 100 m de altura. Con estos resultados podemos afirmar que es posible realizar estudios sin puntos de control en aplicaciones donde no se requiera una precisión centimétrica y consistente. Esto es de gran utilidad para estudios en lugares remotos y de difícil acceso donde el uso de puntos de control u otros métodos topográficos pueden ser imprácticos además de poner en riesgo al personal (Kalacska *et al.*, 2020).

Una de las posibles aplicaciones del uso de drones sin puntos de control es para la caracterización y análisis morfométrico de las dolinas. En este estudio se visualizó una dolina de manera detallada, además de obtener información de su morfología, alturas y dimensiones. Este podría ser un método alternativo para la obtención de parámetros morfométricos en dolinas con el consiguiente ahorro en tiempo y recursos con relación a los métodos existentes (trabajo de campo, LiDAR, imágenes aéreas, imágenes satelitales).

## CONCLUSIONES

En este estudio se determinó el RMSE y la precisión relativa de los ortomosaicos y modelos digitales de elevación a diferentes alturas generados con un dron en una dolina. En los vuelos a 100 m de altura se presentó una menor variación en los valores del RMSE ( $x = 0.13$  m,  $y = 0.14$  m,  $z = 0.23$  m) a diferencia de los valores del RMSE a 80 m de altura ( $x = 0.62$  m,  $y = 1.16$  m,  $z = 0.80$  m) que resultaron con mayor variación.

La precisión relativa más alta se registró a 100 m de altura en los ortomosaicos y varió de 0.03 a 0.36 m con un valor promedio de 0.22 m. La precisión relativa en los MDEs fue muy similar en ambas alturas con el mismo valor promedio (0.94 m) y registrando valores mínimos y máximos de 0.42 y 1.48 m (80 m de altura) y de 0.41 y 1.54 m (100 m de altura) respectivamente.

## Agradecimientos

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada al primer autor para realizar los estudios de posgrado.

Los autores agradecen al Sr. Rodrigo Góngora Puch por las facilidades para realizar el estudio en su propiedad.

**Financiamiento.** Los autores agradecen el apoyo financiero del laboratorio de análisis de suelos, plantas y agua de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la UADY, y del proyecto INIFAP “Elementos del paisaje kárstico de la Península de Yucatán para el aprovechamiento de sus recursos naturales” (clave 2-1.6-11161434635-M-M.2-3).

**Conflictos de interés.** Todos los autores declaran que no hay conflicto de intereses relacionados con esta publicación.

**Cumplimiento de estándares de ética.** La investigación fue realizada y presentada por los autores bajo principios éticos y responsabilidad científica en el manejo de los datos.

**Disponibilidad de datos.** El autor de correspondencia podrá proporcionar la información o datos necesarios con previa solicitud.

## REFERENCIAS

- Aguilar, Y., Bautista, F., Mendoza, M.E., Frausto, O. y Ihl, T., 2016. Density of karst depressions in Yucatán state, Mexico. *Journal of Cave and Karst Studies*, [en línea] 78(2), pp.51–60. Disponible en: <<https://caves.org/pub/journal/PDF/v78/cave-78-02-51.pdf>>.
- Akturk, E. y Altunel, A.O., 2019. Accuracy assessment of a low-cost UAV derived digital elevation model (DEM) in a highly broken and vegetated terrain. *Measurement*, [en línea] 136, pp.382–386. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.12.101>>.
- Bautista, F., Frausto, O., Ihl, T. y Aguilar, Y., 2015. Actualización del mapa de suelos del Estado de Yucatán México: Enfoque geomorfopedológico y WRB. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, [en línea] 2(6), pp.303–315. Disponible en: <[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-90282015000300006&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-90282015000300006&nrm=iso)>.
- Chirico, P.G. y Dewitt, J.D., 2017. Mapping informal small-scale mining features in a data-sparse tropical environment with a small UAS. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, [en línea] 5(3), pp.69–91. Disponible en: <[https://www.researchgate.net/publication/318594813\\_Mapping\\_informal\\_small-](https://www.researchgate.net/publication/318594813_Mapping_informal_small-)

- scale\_mining\_features\_in\_a\_data-sparse\_tropical\_environment\_with\_a\_small\_UAS>.
- Colín Olivares, O., Frausto Martínez, O. y Rodríguez Castillo, F., 2019. Cálculo automatizado de la profundidad de depresiones kársticas a escala detallada. En: *Conocimientos y saberes sobre el karst tropical de México*, Primera. [en línea] CDMX.pp.56–77. Disponible en: <<http://www.amek.org.mx/wp-content/uploads/2019/10/LibroConocimiento-s-Capítulo-3.pdf>>.
- Colomina, I., Blázquez, M., Molina, P., Parés, M.E. y Wis, M., 2008. Towards a new paradigm for high-resolution low-cost photogrammetry and remote sensing. En: *In International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XXI ISPRS Congress, Beijing (China)*. [en línea] pp.1201–1206. Disponible en: <[https://www.researchgate.net/publication/228597947\\_Towards\\_a\\_new\\_paradigm\\_for\\_high-resolution\\_low-cost\\_photogrammetry\\_and\\_remote\\_sensing](https://www.researchgate.net/publication/228597947_Towards_a_new_paradigm_for_high-resolution_low-cost_photogrammetry_and_remote_sensing)>.
- Delgado, C., Bautista, F., Ihl, T.J. y Palma-López, D., 2017. Duración del periodo de lluvias y aptitud de tierras para la agricultura de temporal. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, [en línea] 4(12), pp.485–497. Disponible en: <<http://era.ujat.mx/index.php/rera/article/view/1320>> [Consultado 17 jun. 2020].
- DJI, 2020. *Phantom 4 - La cámara aérea más inteligente jamás creada*. [en línea] Disponible en: <<https://www.dji.com/mx/phantom-4>> [Consultado 6 ago. 2020].
- Ezat, M.A., Fritsch, C.J. y Downs, C.T., 2018. Use of an unmanned aerial vehicle (drone) to survey Nile crocodile populations: A case study at Lake Nyamithi, Ndumo game reserve, South Africa. *Biological Conservation*, [en línea] 223(January), pp.76–81. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2018.04.032>>.
- Gómez-Candón, D., De Castro, A.I. y López-Granados, F., 2014. Assessing the accuracy of mosaics from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery for precision agriculture purposes in wheat. *Precision Agriculture*, [en línea] 15(1), pp.44–56. Disponible en: <<http://link.springer.com/10.1007/s11119-013-9335-4>>.
- Hathcock, L. y MacNeille, R., 2016. *Mosaicking software: a comparison of various software suites*. [en línea] Disponible en: <[http://www.gri.msstate.edu/publications/docs/2016/03/15021Mosaic\\_Software\\_V5.pdf](http://www.gri.msstate.edu/publications/docs/2016/03/15021Mosaic_Software_V5.pdf)>.
- He, Y. y Weng, Q., 2018. 1. Introduction. En: Y. He y Q. Weng, eds. *High Spatial Resolution Remote Sensing Data, Analysis, and Applications*. [en línea] CRC Press.pp.9–17. Disponible en: <<https://www.routledge.com/High-Spatial-Resolution-Remote-Sensing-Data-Analysis-and-Applications/He-Weng/p/book/9781498767682>>.
- Hung, I.-K., Unger, D., Kulhavy, D. y Zhang, Y., 2019. Positional Precision Analysis of Orthomosaics Derived from Drone Captured Aerial Imagery. *Drones*, [en línea] 3(2), p.46. Disponible en: <<https://www.mdpi.com/2504-446X/3/2/46>>.
- James, M.R. y Robson, S., 2012. Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: Accuracy and geoscience application. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, [en línea] 117, pp.1–17. Disponible en: <<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2011JF002289>>.
- Kalacska, M., Chmura, G.L., Lucanus, O., Bérubé, D. y Arroyo-Mora, J.P., 2017. Structure from motion will revolutionize analyses of tidal wetland landscapes. *Remote Sensing of Environment*, [en línea] 199, pp.14–24. Disponible en: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S003442571730281X>> [Consultado 17 jun. 2020].
- Kalacska, M., Lucanus, O., Arroyo-Mora, J.P., Laliberté, É., Elmer, K., Leblanc, G. y Groves, A., 2020. Accuracy of 3D Landscape Reconstruction without Ground Control Points Using Different UAS Platforms. *Drones*, [en línea] 4(13), p.26. Disponible en: <<https://www.mdpi.com/2504-446X/4/2/13>>.
- Klemas, V. V., 2015. Coastal and Environmental Remote Sensing from Unmanned Aerial Vehicles: An Overview. *Journal of Coastal Research*, [en línea] 315(5), pp.1260–1267. Disponible en: <<https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-15-00005.1>>.

- Koci, J., Jarihani, B., Leon, J.X., Sidle, R., Wilkinson, S. y Bartley, R., 2017. Assessment of UAV and Ground-Based Structure from Motion with Multi-View Stereo Photogrammetry in a Gullied Savanna Catchment. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, [en línea] 6(11), pp.1–23. Disponible en: <<http://www.mdpi.com/2220-9964/6/11/328>> [Consultado 17 jun. 2020].
- Leitão, J.P., Moy de Vitry, M., Scheidegger, A. y Rieckermann, J., 2016. Assessing the quality of digital elevation models obtained from mini unmanned aerial vehicles for overland flow modelling in urban areas. *Hydrology and Earth System Sciences*, [en línea] 20(4), pp.1637–1653. Disponible en: <<https://www.hydrol-earth-syst-sci.net/20/1637/2016/>>.
- Manfreda, S., Dvorak, P., Mullerova, J., Herban, S., Vuono, P., Arranz Justel, J. y Perks, M., 2019. Assessing the Accuracy of Digital Surface Models Derived from Optical Surface Imagery Acquired with Unmanned Aerial Systems. *Drones*, [en línea] 3(1), p.15. Disponible en: <<http://www.mdpi.com/2504-446X/3/1/15>>.
- Nex, F. y Remondino, F., 2014. UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied Geomatics*, [en línea] 6(1), pp.1–15. Disponible en: <<http://link.springer.com/10.1007/s12518-013-0120-x>>.
- Orellana Lanza, R., Espadas Manrique, C. y Nava Marín, F., 2010. Climas. En: R. Durán y M. Méndez, eds. *Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán*. p.496.
- Rokhmana, C.A., 2015. The Potential of UAV-based Remote Sensing for Supporting Precision Agriculture in Indonesia. *Procedia Environmental Sciences*, [en línea] 24, pp.245–253. Disponible en: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878029615001000>>.
- Silva, O.L., Bezerra, F.H.R., Maia, R.P. y Cazarin, C.L., 2017. Karst landforms revealed at various scales using LiDAR and UAV in semi-arid Brazil: Consideration on karstification processes and methodological constraints. *Geomorphology*, [en línea] 295, pp.611–630. Disponible en: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.07.025>>.
- Telbisz, T., Látos, T., Deák, M., Székely, B., Koma, Z. y Standovár, T., 2016. The advantage of LiDAR digital terrain models in doline morphometry compared to topographic map based datasets – Aggtelek karst (Hungary) as an example. *Acta Carsologica*, [en línea] 45(1), pp.5–18. Disponible en: <<http://ojs.zrc-sazu.si/carsologica/article/view/4138>>.
- Westoby, M.J., Brasington, J., Glasser, N.F., Hambrey, M.J. y Reynolds, J.M., 2012. “Structure-from-Motion” photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*.
- Xiang, H. y Tian, L., 2011. Method for automatic georeferencing aerial remote sensing (RS) images from an unmanned aerial vehicle (UAV) platform. *Biosystems Engineering*, [en línea] 108(2), pp.104–113. Disponible en: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1537511010002369>> [Consultado 17 jun. 2020].
- Zmarz, A., Rodzewicz, M., Dąbski, M., Karsznia, I., Korczak-Abshire, M. y Chwedorzewska, K.J., 2018. Application of UAV BVLOS remote sensing data for multi-faceted analysis of Antarctic ecosystem. *Remote Sensing of Environment*, [en línea] 217, pp.375–388. Disponible en: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0034425718304073>> [Consultado 17 jun. 2020].